文章编号:1001-5078(2022)03-0355-05

· 激光应用技术 ·

基于光子多普勒测速的长景深动态测试研究

司 宇,刘 吉,武锦辉,冯进宝,刘 昊,严赛美 (中北大学信息与通信工程学院,山西太原030051)

摘 要:目前光子多普勒测速的应用场景多为瞬时、短时的冲击、震动、飞片等测量,采集时间 少、景深距离短,缺少长景深动态测试的应用。为此我们搭建了一套全光纤结构 PDV 以及基 于 LabWindows 的上位机解调软件,以15 kHz 线宽 1550.12 nm 激光器为光源,300 mm 工作距 离非球面镜作为探头,针对运动距离为1.33 m、最高速度 14 m/s 的无杆气缸滑块进行速度测 量。通过多次实验,得出了无杆气缸滑块运动的全程速度曲线,并用积分反推出运动距离与实 际滑块运动距离相符,平均相对误差为-0.5266 %。实验结果表明,光子多普勒测速系统健 壮性良好,在信号光耦合功率低的情况下仍可以得到 16 dB 以上信噪比的干涉信号,大气环境 稳定时可在长景深范围内进行动态测量。

关键词:光子多普勒测速;激光干涉;长景深;动态测量

中图分类号:TN249 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.008

Dynamic measurement of long depth of field based on photonic Doppler velocimetry

SI Yu, LIU Ji, WU Jin-hui, FENG Jin-bao, LIU Hao, YAN Sai-mei

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: At present, the application of Photonic Doppler Velocimetry is mostly aimed at measuring instantaneous and short-term impact, vibration or the velocity of flying-plate, with less acquisition time and short depth of field distance. Up till now, there is lack of application in measuring moving objects with a long depth of field. For this reason, a set of PDV based on all-fiber structure and upper computer demodulation software based on LabWindows are built. It uses a laser module with 15 kHz line width and 1550. 12 nm wave length as light source, an aspherical lens with 300 mm working distance as probe. Speed measurement for rodless cylinder slider with a moving distance of 1. 33 m and a maximum speed of 14 m/s. Through many experiments, the whole time-velocity diagram of rodless cylinder is obtained. Moving distances calculated by integration are in consistent with the actual one, the average relative error of which is -0.5266 %. The experimental result shows that PDV has a strong robustness, and an interference signal with SNR above 16 dB, even the coupled signal power is low. While there is a stable atmosphere, such PDV can be used in measuring moving objects with large depth of field.

Keywords: photonic Doppler velocimetry; laser interferometer; long depth of field; dynamic measurement

基金项目:山西回国留学人员科研资助项目(No. HGKY2019068);山西省自然科学基金(面上项目)(No. 201901D111159)资助。 作者简介:司 字(1998 -),男,硕士研究生,主要从事激光干涉测试技术研究。E-mail:supreme_ee@ outlook.com

通讯作者:刘 吉(1980 –),男,教授,硕士生导师,主要从事微弱信号检测,虚拟仪器软件,特种成像等技术的研究。E-

mail:275952794@ qq. com

收稿日期:2021-05-11

(1)

1 引 言

光子多普勒测速技术(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)是采用外差法进行速度测量的技术^[1], 具有结构简单、测速范围大、数据处理相对简单、测 试精度高、健壮性好的特点,适用于匀速运动以及速 度变化剧烈的被测物^[1-4],适用于多种场景。

国外对于 PDV 的研究以美国 Lawrence Livermore、Los Alamos、Sandia 实验室等为代表,主要致力 于解决超高速测量领域,例如破片、内爆、聚变等场 景下 PDV 信号频率过高和硬件采样率不足、探测器 带宽不够、时间分辨率低之间的矛盾,例如早期提出 利用调谐激光器进行光学降频、微波混频进行电信 号降频,近年 Mance. J. G 等提出以啁啾脉冲激光代 替连续激光提高时间分辨率的方式^[5-8]。而在大范 围测试应用中,以德国 Polytec 公司等为代表的激光 测振仪具有代表性,其工业级产品 IVS – 500 最大工 作距离 3 m,可通过调节档位实现最高 2000 mm/s 的振速测测量。

国内对于 PDV 的研究自上世纪末就已见报 道,中国工程物理研究院在 PDV 的研究方面取得 了瞩目的成绩,针对单点、多点测量,破片、爆轰测 量的实验应用中成果显著,达到了国际领先水 平^[2,9],近年马鹤立等在 PDV 光路结构基础上利用 频域干涉实现了小口径长身管内径测量,200 mm 的 范围内与千分尺测量极差为0.014 mm^[10]。在动态 测量方面,彭映成等用 PDV 结构设计了景深 ±2 cm 的振动位移传感器用于测量防护体受冲击波的形变 位移^[11],王韵致等公布了一种复合光纤的马赫 – 增 德尔外差干涉位移在线测量系统,100 μm 位移测量 标准差为 6 nm。

上述应用均基于短距离、高速运动测量或者低 速精密位移测量。本文在长距离动态测试应用背景 下,如测量枪械自动机运动状态、工业自动化控制监 测等,设计 PDV 系统和实验环境并进行测试分析。

2 PDV 与大景深动态测试原理

PDV 基于迈克尔逊干涉仪模型,本质上对于信 号光的耦合功率有一定要求,而对成像不做要求。

根据光电探测器的光强响应原理,光电探测器 产生的干涉电信号可表示为:

$$I(t) = \frac{k}{2} (A_1^2 + A_2^2) + k A_1 A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \omega_2] + k A_1 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \omega_2] +$$

$$(\phi_1 - \phi_2)$$

其中,k为探测器响应系数; A_1 、 A_2 分别为参考光和 信号光的振幅; ω_1 、 ϕ_1 、 ω_2 、 ϕ_2 分别为其角速度和初 始相位。上式中可以看出含有有效信息的第二项表 达式只与k、 A_1 、 A_2 有关,由于 PDV 光路结构保证了 具有信号强度稳定的参考光,因此即便信号光的质 量因为被测物运动姿态、光学参数、耦合效率等影响 而衰减,只要提高参考光的信号强度即可保证干涉 信号信噪比。干涉信号频率与物体运动速度 \vec{u} 满足 如下关系式:

$$f = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{2\pi} = \frac{2\vec{u}\cdot\vec{l}}{\lambda}$$
(2)

其中, *ī* 为沿激光传播反方向上的单位矢量; λ 为激 光波长。使用交流耦合输出的探测器可以滤除(1) 式中第一项直流成分,减少信号饱和的情况。

在 PDV 的实际使用中,由于单模光纤的数值孔 径较小、光纤微透镜耦合输出的激光光束具有一定发 散角。动态测试中,该共轴光学系统的有效耦合空间 十分有限,只局限于近轴区。利用发散角小于1°的微 棱镜红外反射膜贴在被测物表面以提高耦合效率。 光纤微透镜直径3 mm,60 mW 出射激光在距离透镜 面 1.5 m 处由红外光敏检测卡测量光斑大小为 8.5 mm,同时具有光功率48 mW。实测 150 cm 距离 时环形器3端口静态信号光功率为20~30 μ W,在30 cm 处的静态信光功率可达260 μ W,经过 EDFA 放大 滤波后可满足探测器响应条件。激光系统和探测器 本身噪声为8 mV,用微扰动的方式测量 150 cm 处干 涉信号信噪比,得 16 dB \leq SNR \leq 23 dB,满足信号解 调要求。

光学模块方面,本系统采用的激光器线宽为 15 kHz,波长为1550.12 nm。激光经过隔离器后由 EDFA 放大后进入保偏环形器,耦合进入工作距离 300 mm 带单模尾纤的非球面镜后出射到待测点位, 使用空间光功率计测量探头出射激光功率为 60 mW。被测滑块表面贴红外原向反射膜,反射信号 光耦合进入非球镜,通过带 0.4 nm 带通 ASE 滤波 的预放 EDFA 进行放大,再经由衰减器接入 10GHz 响应率的 PD 探测器(科扬光电,型号 KY-PRM-10G-1-FA)转化为电信号,并用采集卡和示波器同步采 集,通过上位机处理;被测物设置方面,选择无杆气 缸的滑块作为被测速度源。

3 激光干涉测速实验系统

为验证 PDV 在大范围动态测量的应用可行性, 搭建 PDV 干涉测速系统,系统包括光学模块和软件 模块两部分,并设置符合条件的速度源进行实验测 试,实验系统结构如图1所示。



图1 实验系统组成结构图

Fig. 1 Block diagram of experimental system

整体实验流程如下:

实验所使用的空压机工作产生气体压力 0.7 MPa,在该气压下通过手动控制空压机阀门开 关来推动滑块从起点位置开始运动,以滑块撞击气 缸导轨另一端为止停止运动。

实验之前使用光电探测器、一字线激光器、 1 mm宽条纹遮挡的原向反射膜对气缸滑块的运动速 度范围进行粗略测量(如图2),测量结果表明气缸空 载、0.7 MPa 压力下滑块的最高速度可达10~14 m/s, 信号光多普勒频移在 12.9 MHz~18.06 MHz。



(a - 条纹遮挡的反射膜;b - 滑块;c - 光电探测器和一字激光器) 图 2 无杆气缸滑块速度粗测装置 Fig. 2 A device to measure the speed of rodless cylinder's sliding block roughly

采用固定支架减少滑块冲击无杆气缸造成的气缸位移和振动影响,用接近开关(SQP)、LED和光电

二极管构成滑块运动的外触发信号,如图3所示。



图 3 无杆气缸实验设置 Fig. 3 Arrangement of rodless-cylinder in experiment

实验开始前,标记导轨上一点作为滑块运动的固定起始位置,测量起始位置至末端距离133.7076 cm。以可见光接入探头校准光路,调整探头出射光路和滑块运动轨道平行。设置示波器、采集卡以62.5 MHz采样率进行采样。

4 速度测试实验和数据处理

采集卡采集的多普勒频移信号经过 LabWindows 编写的上位机软件显示结果如图 4 所示。

图 4 中所示干涉条纹图像横轴为采样点数,共 计 2500000,采样时间长度为 400 ms,采样率 f_s = 62.5 MHz,纵轴为 4096 级归一化量化电压。包含 无杆气缸滑块运动的全程速度干涉信号,按时间截 取其中有效部分,以 N = 131072 点加窗、M = 10000 更新点进行 FFT 时频变换,所得时间 - 速度曲线如 图 5 所示。



图4 采集卡采集干涉信号

Fig. 4 Interference signal collected by acquisition card





其中横坐标为加窗变换得到的速度点数K,与时间换算关系为 $t_{K} = Mf_{s}K_{o}$ 纵坐标为速度,单位 m/s_{o}

由于空压机气体通过二位三通手动气动开关和 无杆气缸相连,在空压机高压气体涌入无杆气缸一 端时,滑块运动状态表现为自A点开始速度急速上 升,滑块高速运动挤压气缸另一端的空气,使滑块运 动速度在到达极大值后下降,又在高压气体推动和 另一端压缩空气排出气缸双重作用下出现速度缓慢 上升态势,以撞击气缸另一端为标志出现运动速度 为零的B点。由于该PDV结构光路不具有判断被 测物运动方向功能,因此滑块撞击气缸后的支架振 动直接表现为滑块速度在大于0的范围内起伏,运 动直至振动消失,速度归零。

该曲线时间分辨率 $T = Nf_s = 0.16$ ms。根据 FFT 频率分辨率定义和式(2)可得速度分辨率为:

$$v_s = \frac{f_s \lambda}{2N} \tag{3}$$

根据上式可求出相应的速度分辨率为0.370 mm/s。

对 *A* 点至 *B* 点速度积分得到位移曲线如图 6 所示,最大位移为 133.1522 cm。



图6 无杆气缸滑块位移曲线

Fig. 6 Displacement diagram of rodless cylinder's sliding block

总共得到 6 组不同的位移测量数据,以L = 133.7067 cm 为约定真值,相对误差 Relative Error = $(S_i - L)/L \times 100 \%$,测量 6 次 L_i ,根据不确定度公

$$\vec{r}_{a}, \Delta_{A} = 1.05 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6} (L_{i} - L)^{2}}{5}} = 0.0477 \text{ cm}, \Delta_{B} =$$

0.05 cm, 得 $\Delta = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_B^2} = 0.070$ cm, 将位移数据 $S_i(i$ 为整数)和 *L* 进行比较如表 1 所示。

表1 位移测量结果

Tab. 1 Result of displacement measurement

	S_i	L	Relative Error/%
1	132. 4719	133. 7067	- 0. 9235
2	133. 1706	133. 7067	- 0. 4010
3	133. 1169	133. 7067	-0.4411
4	133. 1522	133. 7067	- 0. 4147
5	133. 0307	133. 7067	- 0. 5056
6	133. 0732	133. 7067	- 0. 4738

从实验结果来看 PDV 在 1.33 m 大景深条件下 测量高速运动中的位移测量数据与直接测量结果符 合性好,平均相对误差为 - 0.5266 %,实验证明了 该方案的可行性。

5 结 论

本文以 300 mm 工作距离非球面镜为探头,在 60 mW 小功率激光的条件下搭建 PDV 系统,以无杆 气缸滑块为速度源验证了 PDV 结构在 1.3 m 景深 动态测量中应用的可行性。实验恢复出了滑块完整 速度曲线,且对于加速度突变的反弹点运动状态捕 捉良好。实际在 1.5 m 处仍可以取得有效干涉信 号。结果表明 PDV 结构的健壮性良好,光学设计可 靠,速度分辨率高,展现出 PDV 在工业控制、长景深 动态测速领域,例如监测枪械自动机运动状态以判 断枪械击发是否到位、击发惯性对于枪体影响,枪械

击发频率测试等方面的应用前景。

参考文献:

- [1] Wu Lizhi, Chen Shaojie, Ye Yinghua, et al. Photonic doppler velocimetry used for instant velocity measurement of high-speed small flyer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12):263 267. (in Chinese) 吴立志,陈少杰,叶迎华,等. 用于瞬态高速飞片速度测量的光子多普勒测速系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12):263 267.
- [2] Weng Jidong. Research on the technology of laser interferometry[C]//2015 Science and Technology Annual Report of CAEP(I),2015:9. (in Chinese)
 翁继东.激光干涉测量技术研究[C]//2015 年版中国 工程物理研究院科技年报(I),2015:9.
- [3] Dolan D H. Accuracy and precision in photonic Doppler velocimetry [J]. The Review of scientific instruments, 2010,81(5):083108.
- [4] XQ W, WG X, X W, et al. Effect of surface reflectivity on photonic Doppler velocimetry measurement [J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(5);1009-1016.
- [5] H D D. Extreme measurements with photonic doppler velocimetry (PDV) [J]. The Review of Scientific Instruments, 2020,91(5):051501.
- [6] G M J, M L L B, H D D, et al. Time-stretched photonic Doppler velocimetry [J]. Optics Express, 2019, 27(18).

- [7] Mallick D D, Zhao M, Bosworth B T, et al. A simple dualbeam time-multiplexed photon doppler velocimeter for pressure-shear plate impact experiments[J]. Experimental Mechanics, 2019, 59(1).
- [8] Mallick D D, Zhao M, Parker J, et al. Laser-driven flyers and nanosecond-resolved velocimetry for spall studies in thin metal foils[J]. Experimental Mechanics, 2019, 59(5).
- [9] Mou Xinrui, Zhang Jian, An Fei, et al. Design of optical fiber array coupling system for multi-channel photonic doppler velocimetry [J]. Optical Technique, 2020, 46 (4):443-447. (in Chinese)
 牟瑞欣,张建,安飞,等. 多点光子多普勒测速光纤阵列耦 合系统设计[J]. 光学技术,2020,46(4):443-447.
- [10] Ma Heli, Tao Tianjiong, Liu Shenggang, et al. A measuring system for inner diameter of small-caliber and long gun bore based on frequency domain interferometry [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(5):1077 1082. (in Chinese) 马鹤立,陶天炯,刘盛刚,等. 基于频域干涉的小口径 长身管内径测量系统[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 1077 1082.
- [11] Peng Yingcheng, Guo Xian, Chen Rong, et al. Design of vibration displacement sensor with inertial sliding block based on PDV technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019, (9):5-9. (in Chinese) 彭映成,郭弦,陈荣,等. 基于 PDV 技术的惯性滑块式振动位移传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019, (9):5-9.